

диелектрическая проницаемость зависит не только от влажности, но и от физико-химических свойств вещества. Этот недостаток достаточно легко можно исключить путём предварительной калибровки датчика по сухому (обезвоженному) веществу.

**Выводы.** Таким образом, разработанный датчик сигнализации предельных значений уровня бетонной смеси обладает улучшенными показателями, такими как чувствительность, точность, механическая прочность по сравнению с другими датчиками, используемыми в аналогичных технологических процессах. Кроме того, при соответствующей доработке он может быть использован как измеритель влажности, что даёт ему дополнительные преимущества в технологических процессах изготовления бетонных изделий.

**Список литературы:** 1. Датчики уровня сыпучих материалов. Сайт: РусАвтоматизация [http://rusautomation.ru/sypuchie\\_materialy](http://rusautomation.ru/sypuchie_materialy) (дата доступа 27.03.14). 2. Дмитренко, Л. П. Приборы контроля и регулирования уровня сыпучих материалов / Л. П. Дмитренко // М., Энергия. – 1978. – 96с. 3. Смирнов, В. В. Система автоматического контроля уровня заполнения цементного бункера бетоносмесительного узла / В.В.Смирнов// Фундаментальные исследования.- 2013. – №6. – с. 1094-1097. 4. Брандт, А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Брандт // М., Физматгиз. – 1963. – 144с. 5. Еришов, А. М. Радиоволновый резонаторный метод измерения физических свойств жидкостей с диэлектрическими потерями / А.М. Еришов, А.А. Маслов, А.С. Совлуков, В.Я. Фатеев, В.В. Яценко.// Вестник МГТУ. – 2008. – т. 11. – №3. – с. 498-501.

Поступила в редколлегию 15.05.2014

УДК 621.73

**В. О. ЄВСТРАТОВ**, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;  
**В. М. ЛЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;  
**Я. В. КУТЕЦЬКИЙ**, інженер, НТУ «ХПІ».

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ПРОЦЕСІВ ВИТЯГУВАННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАГОТОВАНОК**

У статті наведені результати експериментального дослідження процесу витягування вісесиметричних деталей з пласкої заготовки. Описані оригінальні способи виявлення особливостей деформації заготовок трьох різних розмірів: «великої», «середньої» та «малої». Експериментальні дослідження підтвердили, що три схеми деформації, зазначені авторами в раніше опублікованих роботах, дійсно мають місце. Отримані експериментальні дані дозволяють обґрунтувати більш досконалу математичну модель процесу витягування і підійти до створення підсистеми САПР розроблення процесів витягування і конструювання робочого інструмента.

**Ключові слова:** витягування, пуансон, матриця, деформація, коефіцієнт витягування.

**Вступ.** Не дивлячись на те, що процес витягування досліджено достатньо детально, залишається ще багато питань, які або не висвітлені в науково-

технічній літературі, або в різних джерелах трактуються по-різному. Одне з таких питань – особливості першого витягування пласкої заготовки.

**Аналіз проблеми.** В роботі [1] детально описано кінематику процесу витягування. Але, на жаль, в ній не розкрито сутність процесу так, як це зроблено, наприклад, в роботі [2]. В.П. Романовський наводить рисунок ([2], с. 83, фіг. 54) та коментар, з яких зрозуміла сутність процесу витягування.

З цієї схеми витікає, що (умовно) процес витягування полягає в тому, що трикутні сектори  $a$  в процесі витягування під дією напружень  $\sigma_\theta$  стискаються і за рахунок пластичної деформації перетворюються у стінку стакану. Звичайно, дійсний процес значно складніший, але схему, що наведена на рис. 1, можна прийняти як перше наближення. З цієї схеми витікає, що із збільшенням ширини фланцю  $h_0 = 0,5 \cdot (D - d)$  напруження  $\sigma_r$  може зростати настільки, що наблизиться до напруження плин  $\sigma_s$  на крайці матриці, а це спричинить до розриву металу заготовки.

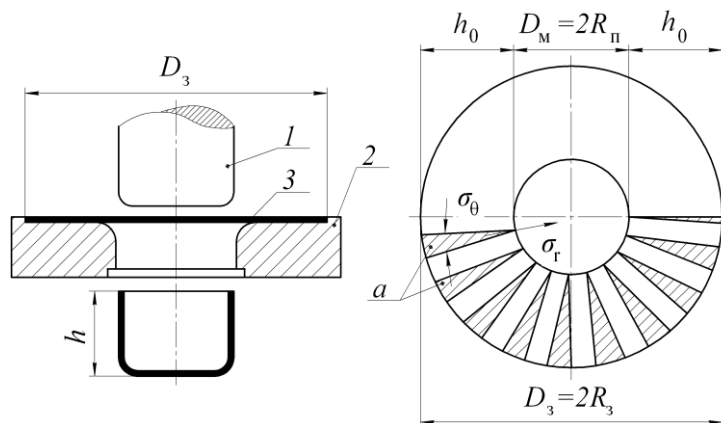


Рис. 1 – Схема витягування циліндричного стакану ([2], с.83, фіг. 54):  
1 – пуансон, 2 – матриця, 3 – заготовка

В опублікованих раніше роботах авторів [3, 4] показано, що процес витягування може здійснюватися за трьома схемами.

**Схема 1.** Реалізується тоді, коли розмір вихідної заготовки  $R_3$  перевищує гранично допустиме для витягування значення  $R_m/m$ . При цьому фланець залишається недеформованим на протязі усього процесу і  $R_\phi = R_3$  (рис. 2,  $a$ ), а формозміна деталі відбувається лише за рахунок потоншення кільцевої частини заготовки, яка знаходиться між тороподібними поверхнями пуансона і границею осередку деформації  $R_{\max}$ :  $(R_n - r_n) \leq r \leq R_m + r_m + \Delta$ . Глибина деталі  $h$  (див. рис. 1) незначна (вона залежить від пластичності

заготованки), а потоншення кільцевої частини – значне. Процес завершується розривом стінки деталі на радіусному переході пуансона  $r_{\Pi}$ .

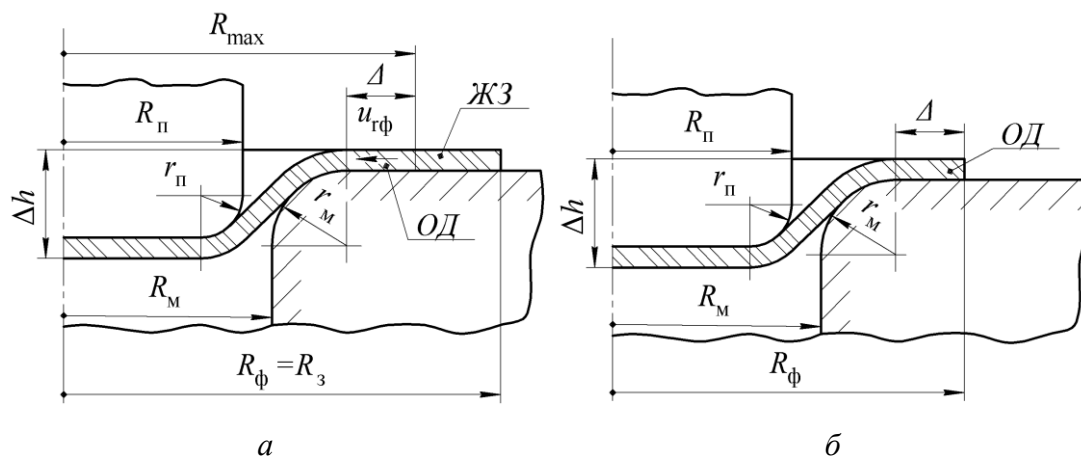


Рис. 2 – Схеми витягування вісесиметричних заготованок: а – «великої»; б – «малої»

**Схема 2.** За характером деформації її можна вважати протилежною схемі 1. Головна її особливість полягає в тому, що уся фланцева частина заготованки  $(R_n - r_n) \leq r \leq R_\phi$  починає втягуватись у матрицю з самого початку витягування (рис. 2, б). Глибина частини, яка витягнена, може бути достатньо великою. Вона визначається мінімальним коефіцієнтом витягування  $m$ . Розриви стінки виключаються (якщо попереджено утворення глибоких гофрів). Процес не супроводжується потоншенням, навпаки, при втягуванні фланця у проміжок між матрицею і пуансоном відбувається відчутне потовщення стінки.

Зазначені схеми є крайніми випадками витягування. Але є ще проміжна між цими схемами – **схема 3**. Головна її особливість полягає в тому, що з початку витягування фланцева частина заготованки  $(r \geq R_m + r_m + \Delta)$  залишається недеформованою, а кільцева  $(R_n - r_n) \leq r \leq (R_m + r_m + \Delta)$  втягується у матрицю. У зв'язку із деформацією кільцевої частини заготованки і значним її зміцненням, збільшенням її несучої здатності, осередок деформації розширюється, охоплює усю периферійну частину заготованки, і увесь фланець поступово втягується у матрицю.

З метою скорочення наступних пояснень, домовимось називати заготованки, які деформуються за схемами 1, 2 і 3 відповідно «великими», «малими» і «середніми».

**Результати дослідження.** Якщо радіуси пуансона і матриці  $r_{\Pi}$  та  $r_M$  брати у відповідності із рекомендаціями [1, 2], то приблизні кількісні співвідношення

між «розмірами» заготованок і розмірами інструмента можна визначити досить наочно на числовій осі (рис. 3).

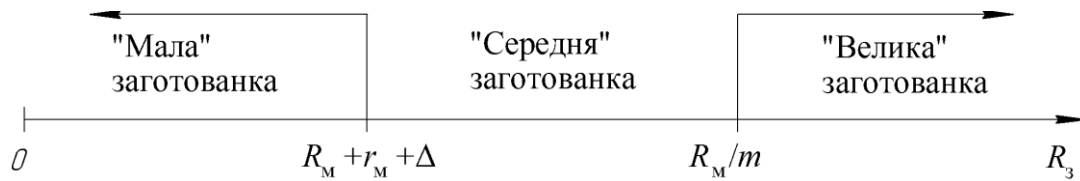


Рис. 3 – Класифікація заготованок за розміром

Тут через  $m$  позначений мінімальний коефіцієнт витягування:  $m = D_{ц}/D_{з \max}$ ; через  $\Delta$  – деякий розмір, що залежить від умов деформації (особливо від тертя). Він може бути визначений на підставі експериментальних досліджень. Решта позначень показані на рис. 1.

Для проведення експериментальних досліджень розроблено стенд (рис. 4).

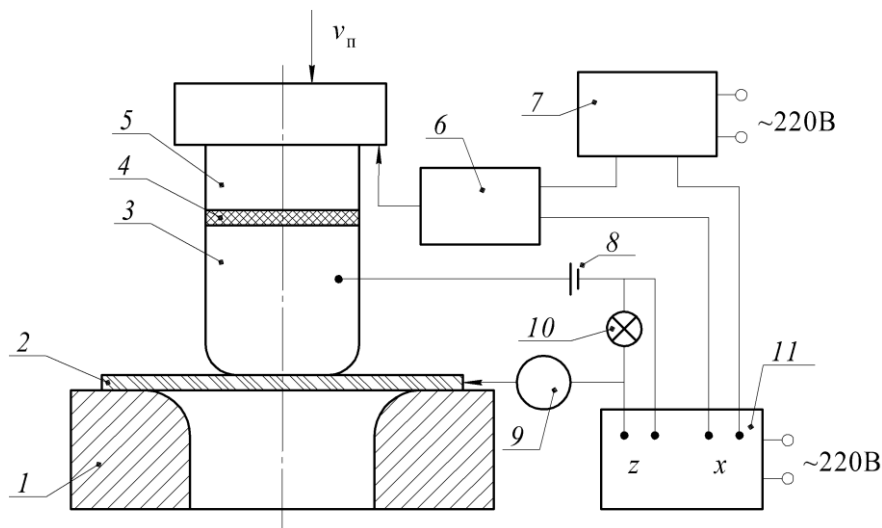


Рис. 4 – Принципова електрична схема дослідного стенда:

- 1 – матриця; 2 – заготованка; 3 – пуансон; 4 – електроізолююча переліжка;  
5 – пуансонотримач; 6 – хромограф; 7 – блок живлення Б5-49; 8 – джерело живлення;  
9 – відмітчик переміщень; 10 – сигнальна лампочка; 11 – самописець Н307

Оригінальність цього стенда полягає в тому, що він передбачає можливість точно фіксувати два важливих моменту деформації: 1) початок процесу витягування (коли пуансон дотикається заготованки) та 2) коли починається радіальна течія фланця заготованки.

Як видно зі схеми, в процесі наближення пуансона до заготованки ланцюг, що включає елементи 2, 3, 8, 10 і 9, не замкнена. В цей час лампочка не

горить, на самописець живлення не подається. Як тільки пуансон 3 дотикнеться до заготованки 2, ланцюг замикається, лампочка загоряється, а на клемі з відмітчика переміщень від джерела живлення 8 подається напруга  $U$  яка фіксується на стрічці самописця Н307. Якщо витягується «велика» заготованка, то деформація не охоплює периферійну частину заготованки, її радіус  $R_{\phi}$  залишається незмінним – він дорівнює радіусу вихідної заготованки  $R_3$ . Ланцюг відмітчика переміщень залишається у замкненому стані, що й фіксується самописцем.

Якщо ж витягується «мала» заготованка, то зразу після дотикання пуансона і заготованки деформація охоплює весь фланець – він втягується у матрицю, його радіус  $R_{\phi}$  зменшується, ланцюг відмітчика переміщень розмикається, напруження  $U$  змінюється, що також фіксується самописцем.

Якщо ж витягується «середня» заготованка, то спочатку деформація не охоплює периферійну частину фланця, ланцюг відмітчика переміщень залишається у замкненому стані і лише після того, як осередок деформації розповсюдиться на увесь фланець, ланцюг відмітчика переміщень розмикається.

Щоб підвищити точність фіксації моменту початку радіального переміщення фланця, у схемі передбачено три контакти в ланцюгу відмітчика переміщень. Вони розташовані під кутом  $120^\circ$  один відносно одного і з'єднані паралельно. Це дозволяє зкомпенсувати похибки центрування заготованки відносно матриці.

Схема дослідного стенду забезпечує можливість того, що ходограф 6 і блок живлення 7 подають на самописець сигнал, який перетворюється у пропорційне переміщення стрічки самописця, а сигнал від джерела живлення 8 перетворюється у відхилення пера самописця. Таким чином, на стрічці (яку домовимось називати ходограмою) по осі  $X$  (поздовжній осі) самописець фіксує переміщення пуансона, а по осі  $Z$  – сигнал відмітчика переміщень.

Для розшифрування ходограм здійснювали попереднє градуювання вимірального тракту і встановили, що одному міліметру переміщення пуансона  $\Delta h$  відповідає 5 міліметрів переміщення стрічки. Це дозволило для кожної ходограми розмітити вісь  $X$  безпосередньо у міліметрах ходу пуансона  $\Delta h$ .

Градуювання ходограми по осі  $Z$  не потрібне, оскільки переміщення пера самописця відбувається тільки у момент відриву фланця від будь-якого з контактів відмітчика переміщень.

На рис. 5 показані три типові ходограми процесу витягування заготованок різних розмірів. На кожній з них чітко визначений хід наближення пуансона ( $\Delta h_n$ ), ідентифікується момент дотикання пуансона до заготованки (мітка  $M_1$ ), коли ланцюг, що містить елементи 2, 3, 8, 10 і 9, замикається;  $\Delta h_1$  – момент початку радіальної деформації фланця (розрив ланцюга відмітчика переміщень 9;  $\Delta h_m$ ,  $\Delta h_c$ , і  $\Delta h_b$  – переміщення пуансона при витягуванні «малої», «середньої» та «великої» заготованки відповідно.

На ходограмах витягування «малої» та «середньої» заготованок також дуже чітко ідентифікується момент розриву ланцюга у зв'язку з початком деформування фланця. На ходограмі витягування «великої» заготованки показано момент розриву стінки заготованки, який визначений по різкому падінню зусилля деформації (дослідний стенд не передбачав окремого запису на ходограмі зусилля деформації).

Таким чином, реальність усіх трьох згаданих вище схем знайшла переконливе підтвердження.

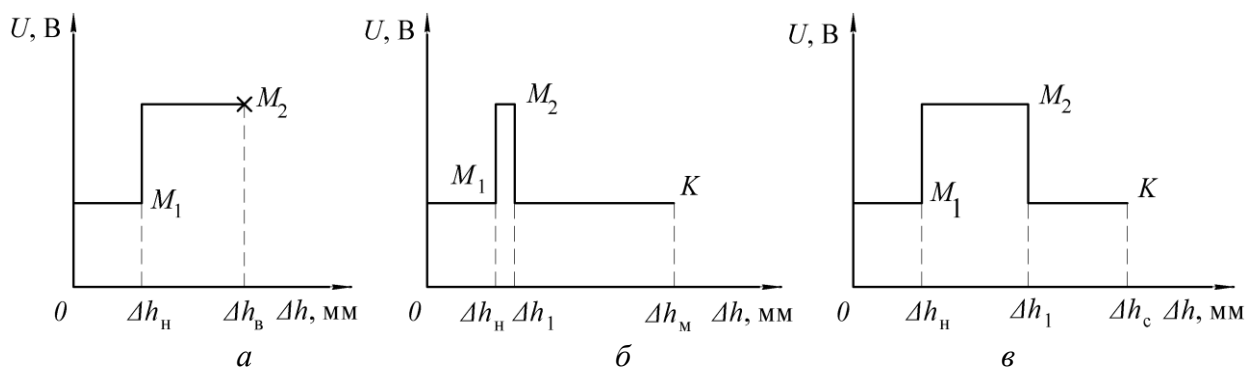


Рис. 5 – Ходограми витягування заготованок різних розмірів: *a* – «великої»; *б* – «малої» та *в* – «середньої»

Далі авторами проведено кількісне дослідження деформованого стану заготованок різних розмірів. Для цього використали метод прецизійних координатних сіток [5]. Його суть полягає в тому, що замість ортогональної (або будь-якої іншої) сітки, що утворюється дряпанням (або іншим способом), використовується сітка, сформована виключно з вузлових елементів, які отримані шляхом вдавлювання індентора трикутної форми.

На вихідну заготованку діаметром  $D_3$  по координатним осям  $x$  і  $y$  наносили трикутні мітки з кроком 2 мм. Крім того, по колу діаметром  $D_3 - 2$  мм через кожні  $45^\circ$  наносили розетки з трьох міток. Відстані між мітками вимірювали на інструментальному мікроскопі до деформації і після невеликої

деформації. Далі результати вимірювань обробляли статистично. Отримали такі результати: для «великих» заготованок, які деформували без змащування, осередок деформації охоплює лише кільцеву частину вихідної заготованки в межах  $R_{\text{п}} - r_{\text{п}} \leq r_{\text{од}} \leq R_{\text{м}} + r_{\text{м}} + \Delta$ , але не розповсюджується на увесь фланець. Це означає, що при  $r > R_{\text{м}} + r_{\text{м}} + \Delta$  фланець не деформований – там розташовується жорстка зона.

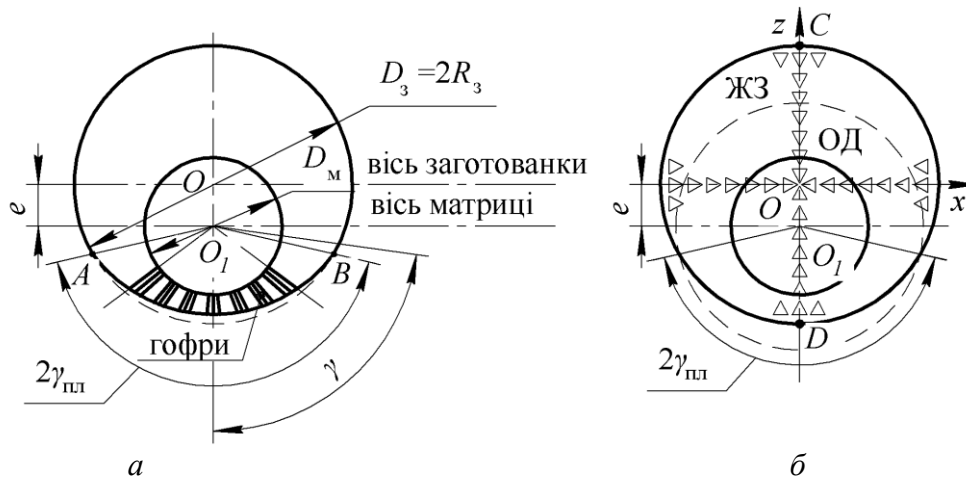
Експерименти з визначення деформованого стану виявились надзвичайно трудомісткими. Тому автори поки що не мають достатніх даних, щоб узагальнювати матеріал та виводити емпіричні формули. Проте нам вдалося знайти простий і дуже ефективний підхід до аналізу деформованого стану фланця при витягуванні заготованок різних розмірів: «великих», «середніх» та «малих».

Відомо, що при витягуванні заготованок «середніх» розмірів без притиску або з невеликим зусиллям притиску на периферії фланця формуються гофри, а при витягуванні «великих» заготованок гофри не утворюються. Щоб встановити якісно наявність переходу від заготованок «середніх» розмірів до заготованок «великих» розмірів, витягували заготованки з великим ексцентриситетом. На рис. 6, а добре видно, що при  $R_3 > 1,8 R_{\text{м}}$  гофри не утворюються, а при  $R_3 < 1,8 R_{\text{м}}$  вони чітко ідентифікуються.

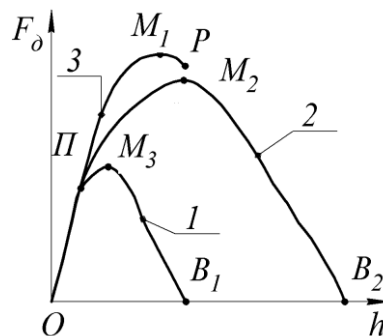
Для кількісного аналізу на заготованку діаметром 90 мм наносили дві системи координатних сіток, як це показано на рис. 6, б. Перша система – ортогональна з кроком 2 мм (розетки  $P_z$ ), друга – кругова, також із кроком 2 мм, але у вигляді розеток по три мітки ( $P_{\phi}$ ). Відстані між мітками визначали на інструментальному мікроскопі БМИ-1 до деформації із випадковою похибкою  $\pm 1$  мкм, а після деформації – із похибкою  $\pm 5$  мкм. Заготованку деформували так, що осі заготованки і матриці не збігались на 22 мм. Це дозволило на одній заготованці моделювати витягування одночасного витягування кількох заготованок з коефіцієнтами витягування від 0,242 до 0,726.

В межах кута  $2\gamma_{\text{пл}}$  пластична деформація фланця виражена явно (див. рис. 6, а). На частині фланця, де  $\phi < 180 - \gamma_{\text{пл}}$ , деформація не спостерігається.

На експериментальному стенді, базою якого слугувала універсальна дослідна машина УИМ-50, записували графіки залежності зусилля витягування  $F_{\delta}$  від переміщення пуансона  $\Delta h$ . Графіки  $F_{\delta} = f(\Delta h)$  подані на рис. 7.

Рис. 6 – Зразок: *a* – після несиметричного витягування; *б* – схема розмічування

Для витягування «великих» заготовок характерна крива  $ОПМ_1P$ . Такі заготовки деформуються в одну стадію: відбувається потоншення кільцевої області, її значне зміцнення і деформація до руйнування (відрив донця). Максимум на кривій (точка  $M_1$ ) визначає початок утворення «шийки»; точка  $P$  відображує руйнування донця заготовки.

Рис. 7 – Типові графіки залежності зусилля витягування  $F_\delta$  від ходу пуансона  $\Delta h$  для різних заготовок: 1 – «малої»; 2 – «середньої»; 3 – «великої»

Для витягування «малих» заготовок характерна крива  $ОМ_3B_1$ . Тут зразу ж починається втягування заготовки в матрицю. Вихід фланця на тороподібну поверхню матриці (коли  $R_\phi = R_m + r_m$ ) відповідає точці  $M$  на кривій. Далі починається зменшення зусилля майже до нуля (коли фланець повністю перетвориться на вертикальну стінку).

Для витягування «середніх» заготовок характерна крива  $ОПМ_2B_2$ . Оскільки розмір цієї заготовки більший, ніж «малої», остільки довжина кривої  $ОПМ_2B_2$  більша за довжину кривої  $ОМ_3B_1$ . Тут максимум (точка  $M_2$ ) також визначається умовою  $R_\phi = R_m + r_m$ .



Треба підкреслити дуже важливий експериментальний факт: при витягуванні заготованок різних розмірів точка  $P$  може змінювати своє положення, але при будь-яких розмірах заготовки (якщо ця заготовка дійсно «середня»!) вона (точка  $P$ ) залишається на кривій  $ОПМ_2P_2$ .

**Висновки.** 1. Експериментальні дослідження підтвердили, що три схеми деформації, зазначені авторами в раніше опублікованих роботах, дійсно мають місце. 2. Отримані експериментальні дані, що характеризують формозміну і силовий режим витягування вісесиметричних деталей, які дозволяють обґрунтувати більш досконалу математичну модель процесу витягування і підійти до створення підсистеми САПР розроблення процесів витягування і конструювання робочого інструмента.

**Список літератури:** 1. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х томах. Том 4. Под ред. *А.Д. Матвеева*. М: Машиностроение, 1987. 2. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке. Изд. 2-е. М.-Л.: Машиностроение, 1954. 3. *Евстратов В.А., Торяник В.В., Левченко В.Н.* Анализ процесса вытяжки // Кузнечно-штамповочное производство, 1996. – №4. – С. 2-5. 4. *Евстратов В.А., Левченко В.Н.* Влияние упрочнения на силовой режим вытяжки // Труды международной научно-технической конференции 12-14 мая 1997 г., часть 5, Харьков, 1997, С. 166-169. 5. А.с. 1064128 СССР, МКИ G 01 В 11/16. Способ определения деформаций.

Надійшла до редколегії 29.04.2014

УДК 621.771.634

**А. А. КОРЕНЬКОВА**, магістрант, НТУ «ХПІ»;

**Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ**, канд. техн. наук, с. н. с., НТУ «ХПІ».

### **АНАЛИЗ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКЕ ГНУТЫХ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ**

Исследования показали, что деформируемость круглых отверстий увеличивается с возрастанием углов подгибки, толщины металла, уменьшением ширины подгибаемых полок и величины перемычки между отверстиями. Величина отклонения в размерах отверстий по сравнению с исходными составляет 0,07-1,08% у угловых профилей и 0,07-3,20% у швеллерных. В работе установлено, что при формовке перфорированных профилей по жестким режимам происходит многократное возрастание деформирования отверстий.

**Ключевые слова:** профили перфорированные, формовка, валки, отверстия, формоизменение.

**Введение.** Перфорированные профили – перспективный вид металлопродукции, успешно применяемый в промышленности и строительстве, и получающий всё большее распространение. Значение профилирования в последнее годы непрерывно возрастает благодаря дешевизне изготовления гнутых профилей, высокой производительности оборудования, возможности сочетания профилирование с другими технологическими операциями